УДК 536.2.083

Ю.В.ШАРИКОВ, *д-р техн. наук, профессор, uvshar@mail.ru*
А.А.МАРКУС, *аспирант, (812) 328-84-40*
Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», Санкт-Петербург

Y.V.SHARIKOV, *Dr. in eng. sc., professor, uvshar@mail.ru*
A.A.MARKUS, *post-graduate student, (812) 328-84-40*
National Mineral Resources University (Mining University), Saint Petersburg

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПОТОКОВ В ТРУБОПРОВОДАХ И ТРУБЧАТЫХ ОБЪЕКТАХ

Рассматривается математическая модель для оценки теплофизических характеристик изоляции трубопроводов и разработка нового типа теплоизоляционного материала. Предлагается использовать ячеистую структуру теплоизоляционного материала, заполненную воздухом, для теплоизоляции тепловых сетей. Ее эффективность подтверждена расчетами, выполненными с помощью математической модели.

Ключевые слова: математическое моделирование, труба, теплоизоляция.

MATHEMATICAL MODELING OF HEAT TRANSFER IN PIPELINES AND PIPE'S OBJECTS

This article describes a mathematical model to estimate the thermophysical properties of insulation of pipelines and the development of a new type of insulating material. It is proposed to use a cellular structure insulating material, filled with air for thermal heating systems. Its effectiveness is confirmed by calculations performed using a mathematical model.

Key words: mathematical modeling, a pipe, a thermal insulation.

В связи с дефицитом и повышением стоимости энергоносителей и топлива в настоящее время остро стоит задача энергосбережения. Особенно актуальной она является для снижения потерь тепла в трубопроводах и газоходах металлургического, нефтеперерабатывающего, горного производств и коммунального сектора. Путями ее решения являются: совершенствование конструкции теплоизолирующих материалов; эффективный мониторинг тепловых потерь, основанный на применении математического моделирования и диагностике с помощью измерительных приборов. В статье рассматривается математическая модель для оценки теплофизических характеристик изоляции трубопроводов и разработка нового типа теплоизоляционного материала.

В общем виде теплоизолированную трубу можно представить в виде следующей конструкции: внутренняя труба (чаще всего металлическая) покрыта изолирующей оболочкой (в виде трубы из полимерных материалов) с таким расчетом, что между ними есть кольцевой зазор, заполненный материа-

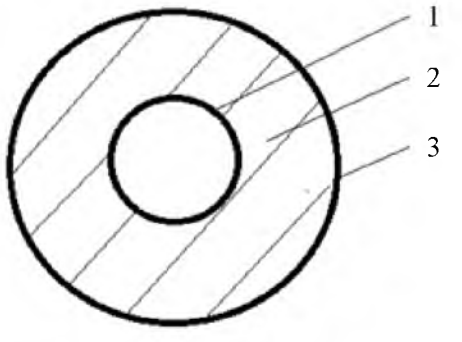


Рис.1. Структура теплоизоляции трубопроводов
1 – горячая труба; 2 – теплоизоляционная структура; 3 – наружная оболочка

Таблица 1

Свойства теплоизоляционных материалов

Материал	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)	Придельная температура применения, °С	Класс горючести*	Колкость
ППУ	0,035	От –60 до 250	Г	Нет
Базальтовое волокно	0,045	От –60 до 300 – 600	НГ	Нет
Минеральная вата	0,1	От –190 до 1000	НГ	Да

* НГ – негорючее, Г – горючее.

лом с низким значением коэффициента теплопроводности. Общая схема теплоизолированной трубы представлена на рис.1 [4,5].

В качестве теплоизоляции для трубопроводов применяют чаще всего пенополиуритан (ППУ), базальтовое волокно, минеральную вату. Все эти материалы обладают различными недостатками, которые осложняют их эффективное применение (табл.1) [4].

При традиционном способе теплоизоляции трубопроводов необходимо полностью заполнять кольцевой зазор в межтрубном пространстве каким-либо теплоизолирующим материалом. Возможен также другой подход – использовать в качестве теплоизолирующей структуры воздух или другой газ, который бы заполнял межтрубное пространство. Рассмотрим новую конструкцию теплоизолированной трубы, разработанную на этих принципах.

Теплоизолированная труба состоит из двух концентрически расположенных труб (тепло- и гидроизолирующей), на торцах которых находятся заглушки. Теплоизолирующая труба покрыта тонким экраном из материала с низким значением коэффициента теплопроводности и низкой степенью черноты. Теплоизолирующим материалом служит газ, имеющий наименьшую теплопроводность по сравнению с другими веществами.

Кольцевой зазор между трубами фиксируется за счет крепежных элементов, периодически заполняющих пространство между ними, например воздухом; газом, обладающим меньшей теплопроводностью, чем воздух (Ar, Xe, Kr и другие газы); газом, обладающим способностью поглощать тепловое излучение, идущее от экрана (CO_2).

Воздух или другой газ, обладая низким значением коэффициента теплопроводности, выполняет главную теплоизолирующую функцию. Материал периодической структуры фиксирует наружную гидроизолирующую трубу относительно внутренней теплоизолируемой. Образующийся кольцевой газовый зазор обеспечивает низкое значение коэффициента теплопроводности в межтрубном пространстве. В качестве материалов периодической структуры могут выступать различные структуры: сетка-рабица, система центраторов, шнур или шланг из ПВХ и т.п. Торцы труб гермепотерь тепла за счет конвективного теплообмена (рис.2).

Для сравнения эффективности теплоизолированных труб существующей и новой конструкций проводилось математическое моделирование температурного поля и тепловых потоков с использованием среды COMSOL Multiphysics. В качестве уравнения, характеризующего процесс, использовалось дифференциальное уравнение, описывающее явление теплопередачи и конвекции, если кольцевой зазор между трубами заполнен теплоизолирующим материалом [3,4]:



Рис.2. Новая конструкция теплоизолированной трубы

1 – теплоизолируемая стальная труба, покрытая экраном; 2 – материал периодической структуры; 3 – гидроизолирующая пластиковая заглушка; 4 – заглушка

$$\alpha_{\text{вн}}(T_{\text{воз}}^{\text{вн}} - T_{\text{ст}}^{\text{вн}}) - \bar{n}(-k\nabla T) = \alpha_{\text{нар}}(T_{\text{ст}}^{\text{нар}} - T_{\text{воз}}^{\text{нар}}), \quad (1)$$

где $\alpha_{\text{вн}}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи на внутренней поверхности теплоизолируемой трубы, Вт/(м^2·К); $T_{\text{воз}}^{\text{вн}}$ – температура воздуха внутри теплоизолируемой трубы, К; $T_{\text{ст}}^{\text{вн}}$ – температура внутренней поверхности стенки теплоизолируемой трубы, К; $\bar{n}$ – направление вектора теплового потока к поверхности; k – коэффициент теплопередачи в стенке теплоизолированной трубы, Вт/К; $k = f(\lambda_i, \delta_i)$, λ_i – коэффициент теплопроводности i-й стенки трубы, Вт/(м^2·К), δ_i – толщина i-й стенки трубы, м; ∇T – градиент температуры в стенке по радиусу, К/м; $\alpha_{\text{нар}}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи от наружной стенки гидроизолирующей трубы, Вт/(м^2·К); $T_{\text{ст}}^{\text{нар}}$ – температура поверхности стенки гидроизолирующей трубы, К; $T_{\text{воз}}^{\text{нар}}$ – температура окружающей среды, К.

Если рассматривать процесс теплопередачи через стенку трубы с воздушной теплоизоляцией, то уравнение (1) примет вид

$$\alpha_{\text{вн}}(T_{\text{воз}}^{\text{вн}} - T_{\text{ст}}^{\text{вн}}) - \bar{n}(-k\nabla T) + \alpha_{\text{ср1}}(T_{\text{ст1}}^{\text{ср}} - T_{\text{вн.воз1}}^{\text{ср}}) + \alpha_{\text{ср2}}(T_{\text{вн.воз2}}^{\text{ср}} - T_{\text{ст2}}^{\text{ср}}) = \alpha_{\text{нар}}(T_{\text{ст}}^{\text{нар}} - T_{\text{воз}}^{\text{нар}}), \quad (2)$$

где $\alpha_{\text{ср1}}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи от теплоизолирующего экрана в межтрубное пространство, Вт/(м^2·К); $T_{\text{ст1}}^{\text{ср}}$ – температура на поверхности теплоизолирующего экрана, К; $T_{\text{вн.воз1}}^{\text{ср}}$ – температура воздуха около поверхности теплоизолирующего экрана, К; $\alpha_{\text{ср2}}$ – коэффициент конвективной теплоотдачи к поверхности гидроизолирующей трубы, Вт/(м^2·К); $T_{\text{ст2}}^{\text{ср}}$ – температура на внутренней поверхности гидроизолирующей трубы, К; $T_{\text{вн.воз2}}^{\text{ср}}$ – температура воздуха около внутренней поверхности гидроизолирующей трубы, К.

Были приняты следующие граничные условия: внутри стальной теплоизолируемой трубы происходит вынужденное движение воздуха при постоянных значениях температуры и коэффициента конвективной теплоотдачи для вынужденной конвекции; для наружной поверхности трубы температура окружающей среды и коэффициент конвективной теплоотдачи для свободной конвекции постоянны. Также для расчета использовалась теплоизолируемая труба с наружным диаметром 108 мм и толщиной стенки 5 мм, изготовленная из стали с коэффициентом теплопроводности 44,5 Вт/(м·К); в качестве гидроизолирующей трубы использовалась пластиковая труба с наружным диаметром 200 мм и толщиной стенки 5 мм, коэффициент теплопроводности стенки 0,38 Вт/(м·К). [1,5] (табл.2, 3).

Таблица 2

Физические переменные, задающие граничные условия

Параметры	Внутренняя поверхность	Наружная поверхность
Скорость воздушного потока	$w_1 = 10$ м/с	$w_1 = 0$ м/с
Диаметр	$d_1 = 0{,}098$ м	$d_2 = 0{,}2$ м
Коэффициент кинематической вязкости	$\nu_1 = 23{,}13 \cdot 10^{-6}$ м^2/с	$\nu_2 = 16{,}00 \cdot 10^{-6}$ м^2/с
Коэффициент температурного расширения	$\beta_1 = 0{,}0027$	$\beta_2 = 0{,}0033$
Ускорение свободного падения	$g = 9{,}8$ м/с^2	$g = 9{,}8$ м/с^2

Коэффициент конвективной теплоотдачи для вынужденной конвекции определим по формуле [3, 4]

$$\alpha_{\text{вн}} = \text{Nu}_1 \lambda 1/d_1,$$

где Nu_1 – число Нуссельта, которое характеризует интенсивность процессов конвективного теплообмена, $\text{Nu}_1 = 0{,}018 K_1 \text{Re}^{0{,}8}$; Re – безразмерное число Рейнольдса, которое характеризует гидродинамику потока воздуха, $\text{Re} = w_1 d_1 / \nu_1$.

Коэффициент конвективной теплоотдачи для свободной конвекции

$$\alpha_{\text{нар}} = \text{Nu}_2 \lambda_2 / d_2,$$

где Nu_2 – число Нуссельта свободной конвекции, $\text{Nu}_2 = 0{,}46 \text{Gr}^{0{,}25}$, Gr – число Грасгофа, которое характеризует относительную эффективность подъемной силы, вызывающей свободно-конвективное движение среды, $\text{Gr} = \beta_2 g_2 \Delta T_2 d_2^3 / \nu_2^2$.

Таблица 3

Теплофизические параметры, характеризующие стенку теплоизолированной трубы

Материал	Наружный диаметр, м	Толщина стенки, м	Коэффициент теплопроводности, Вт/(м·К)
Теплоизолированная труба	0,108	0,005	44,5
Кольцевой зазор	0,19	0,041	Зависит от материала
Теплоизолирующий экран	0,128	0,01	0,035
Гидроизолирующая труба	0,2	0,005	0,38

Таблица 4

Результаты расчетов

Граничные условия	Параметры						
	$\alpha_{вн}$, Вт/(м^2·К)	$\alpha_{внеш}$, Вт/(м^2·К)	q, Вт/м^2	$t_{баз}$, °С	$t_{ППУ}$, °С	$t_{min.}$, °С	$t_{воз}$, °С
Температурное поле трубы, изолированной:							
базальтовым волокном	29,66	25,62	0,32	31,8			
ППУ	29,66	25,62	0,25		31,4		
минеральной ватой	29,66	25,62	0,64			33,8	
Температурное поле трубы с воздушной изоляцией	29,66	25,62	0,22				31,4

Примечание. Площадь потерь тепла S = 0,00628 м^2.

Коэффициент конвективной теплоотдачи от теплоизолирующего экрана в межтрубное пространство $\alpha_{ср1}$ и коэффициент конвективной теплоотдачи к поверхности гидроизолирующей трубы $\alpha_{ср2}$ вычисляются с помощью программного пакета COMSOL Multiphysics.

После решения дифференциального уравнения с приведенными граничными условиями были получены значения температурного поля и плотности теплового потока через стенку трубы (табл.4).

Выводы

1. Данная математическая модель теплоизолированной трубы может быть рекомендована на стадии проектирования и эксплуатации трубопроводных сетей, так как позволяет оценивать потери тепла для различных теплоизоляторов и выбрать наиболее подходящий для данного случая.

2. Использование воздуха в качестве теплоизолирующего материала более эффективно, в отличие от традиционных теплоизоляционных материалов, поскольку тепловые потери через «воздушную трубу» в 3 раза меньше, чем потери тепла у труб с базальтовым волокном или минеральной ватой, и незначительно ниже, чем для ППУ-изоляции.

3. Применение данной конструкции будет способствовать низким тепловым потерям и энергопотерям. Следовательно, меньше топлива потребуется на производство энергии и соответсвенно выделится меньше веществ при его сжигании. Все это будет способствовать улучшению экологической обстановки.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Казанцев Е.И.* Промышленные печи. М., 1964. 452 с.

2. *Кривандин В.А.* Теплотехника металлургического производства / А.В.Кривандин, В.А.Арутюнов, В.В.Белоусов. М., 2002. Т.1. 608 с.

3. *Кутателадзе С.С.* Теплопередача и гидродинамическое сопротивление. М., 1990. 367 с.

4. *Михеев М.А.* Основы теплопередачи / М.А.Михеев, И.М.Михеева. М., 1973. 319 с.

5. Теплоизоляция. Материалы. Конструкции. Технологии / Под ред. С.М.Кочергина. М., 2008. 440 с.

REFERENCES

1. *Kazantsev E.I.* Industrial furnaces. Moscow, 1964. 452 p.

2. *Krivandin V.A.* Heat engineeringof metallurgical production / V.A.Krivandin, V.A.Arutyunov, V.V.Belousov. Moscow, 2002. , 2002. Vol.1. 608 p.

3. *Kutateladze S.S.* Heat transfer and flow resistance. Moscow, 1990. 367 p.

4. *Mikheev M.A.* Fundamentals of Heat Transfer / M.A.Mikheev, I.M.Mikheev. Moscow, 1973. 319 p.

5. Insulation. Materials. Construction. Technology / Edited by S.M.Kocherhin. Moscow, 2008. 440 p.